

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ВІБРОРЕШЕТА ПРИ НЕРІВНОМІРНІЙ ПОДАЧІ СИПКОЇ СУМІШІ

М. В. Півень

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра фізики і теоретичної механіки*
E-mail: m.v.piven@gmail.com

В. О. Волох

Кандидат технічних наук
Кафедра механізації виробничих процесів у АПК
Луганський національний аграрний університет
вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61022
E-mail: volokh69vo@gmail.com

А. В. Півень

Асистент
Кафедра організації виробництва,
бізнесу та менеджменту*
E-mail: alenapiven2017@gmail.com

С. О. Харченко

Доктор технічних наук, доцент
Кафедра оптимізації технологічних
систем імені Т. П. Євсюкова*
E-mail: kharchenko_mtf@ukr.net

*Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка
вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61022

Робота присвячена дослідженню впливу нерівномірної подачі сипкої суміші на процес завантаження віброрешета. Встановлені закономірності товщини шару, поздовжньої та поперечної складових швидкості, щільності сипкої суміші та питомого завантаження на всій площі поверхні віброрешета при нерівномірній подачі на вході. Нерівномірність подачі задавалась опуклим, увігнутим та трикутним профілем початкової швидкості по ширині на вході решета.

При розглянутих профілях характеристики потоку змінюються однаково по довжині решета. По ширині решета характеристики потоку змінюються у відповідності з профілем початкової швидкості. При опуклому профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж поздовжньої осі решета та найменші біля бокових стінок, поперечна складова швидкості напрямлена від поздовжньої осі до бокових стінок. При увігнутому профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж бокових стінок, найменші вздовж поздовжньої осі, поперечна складова швидкості напрямлена від бокових стінок до осі. При трикутному профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж однієї бокової стінки і найменші біля протилежної, поперечна складова швидкості напрямлена до однієї бокової стінки.

При опуклому профілі початкової швидкості відбувається перевантаження поверхні вздовж поздовжньої осі решета, та недовантаження біля бокових стінок. При увігнутому профілі – поверхня перевантажена біля бокових стінок, а вздовж поздовжньої осі решета недовантажена. При трикутному профілі – поверхня перевантажена вздовж однієї бокової стінки, і недовантажена вздовж протилежної. Найбільші відхилення питомого завантаження мають місце біля вхідного перерізу потоку, найменші – біля вихідного.

Закономірності розподілу питомого завантаження решета є визначальними при проектуванні живильників і розподільників сипких сумішей та розрахунках режимів сепарування

Ключові слова: *вібраційне решето, сипка суміш, питоме завантаження поверхні, нерівномірна подача суміші*

1. Вступ

Завантаження зернових сепараторів, включаючи подачу і розподіл оброблюваного матеріалу по поверхні решета, є одним із чинників, що забезпечують якість і продуктивність процесу сепарування. В більшості робіт [1–8] з вивчення руху та сепарування сипких сумішей приймалося, що подача на вході рівномірна і змінювання завантаження решета не досліджувалось. Однак відхилення питомого завантаження від нормативної величини приводить до виникнення ділянок перевантаження або недовантаження робочої поверхні, що знижує ефектив-

ність сепарування. Нерівномірність розподілу сипкої суміші по робочій поверхні обумовлена нерівномірністю подачі суміші по ширині на вході решета [9]. Подача суміші змінюється внаслідок нестабільності роботи транспортуючих машин, нерівномірного висипання суміші із накопичувальних бункерів, похибок дозуючих та розподільних пристроїв, неоднорідності фізико-механічних властивостей суміші та інших виробничих факторів.

Експериментальними дослідженнями у виробничих умовах встановлено, що робочі органи зерноочисних машин завантажуються нерівномірно по ширині [9]. Із всієї ширини на центральну ділянку, яка складає 30 % усієї

ширини, потрапляє 70 % оброблюваного матеріалу. На крайній ділянці решета, які складають 50 % усієї ширини, потрапляє 10 % зернової суміші. Максимальна подача по ширині не співпадає з серединою робочого органу, а найбільше відхилення від середнього значення подачі по ширині досягає 20 %.

Завантаження робочої поверхні визначається такими характеристиками потоку як товщина шару, швидкість і щільність суміші. Вказані характеристики чинять суттєвий вплив на складові процеси сепарування, такі як проходження дрібних частинок крізь шар до решета і просіювання через його отвори. Отже, дослідження процесу завантаження віброрешета пов'язано насамперед з дослідженням характеристик потоку суміші.

Дослідження процесу завантаження віброрешета, при різній за характером нерівномірності подачі дозволить визначити ділянки перевантаження або недовантаження робочої поверхні з врахуванням причин виникнення. Вказані характеристики є визначальними при проектування живильників і розподільників сипких сумішей та при розрахунках режимів сепарування. Отже, поставлена задача є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботах [10, 11] приведені результати досліджень процесу сепарування зернистих матеріалів за розмірами на ситових класифікаторах. Побудована математична модель розділення матеріалів на основі стохастичних процесів, визначена інтенсивність просіювання частинок через отвори з врахуванням зміни величини завантаження, впливом бокових стінок та багатофазністю суміші. Показано, що процес просіювання чутливий до змін завантаження робочої поверхні. Але залишились не вирішеними питання пов'язані з розподілом оброблюваного матеріалу по площі сита та впливом на цей розподіл початкової подачі суміші. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі пов'язані зі складністю задачі, що залежить від багатьох факторів, величини яких мають випадковий характер, що робить відповідні дослідження недоцільними.

Автори роботи [12] відзначають суттєвий вплив рівномірності розподілу суміші по поверхні решета на процес розділення. Сам процес сепарування розділений на стадії: неупорядкованого режиму, коли початковий розподіл сипкої суміші відіграє значну роль і визначає тривалість процесу розділення; стаціонарного режиму, коли розподіл сипкої суміші рівномірний в усіх точках шару.

В роботі [13] встановлений характер нестійкого руху суміші на початку решета. Визначено, що в зоні завантаження решета характер відносного руху частинок суміші може бути нестійким і вони можуть рухатись по складних криволінійних траєкторіях. Це безпосередньо впливає на рівномірність розподілу суміші по периметру сепаруючої поверхні, приводить до перевантаження на одних ділянках і недовантаження на інших, внаслідок чого якість сепарування знижується. Але не досліджено рух зернової суміші як суцільного середовища, а змодельовано рухом матеріальної точки. Однак, застосування такої моделі при розрахунку руху шару, товщина якого перевищує розміри окремих частинок, дає значні похибки, і робить ці дослідження недоцільними.

Варіантом подолання зазначених труднощів може бути застосування нового способу моделювання в якому

рух шару суміші, описується рівняннями руху в'язкої рідини [14, 15]. В основу цього напряму покладена аналогія в поведінці в'язкої рідини і сипкого середовища в умовах вібрацій [16]. Саме такий підхід використаний в роботі [17] для дослідження змінювання швидкості потоку суміші по довжині решета при гармонічних пульсаціях початкової швидкості на вході решета, яка обумовлює нерівномірність подачі.

Встановлено, що при нерівномірній подачі суміші на решето довжина області нерівномірного руху менше довжини робочої поверхні решета, але зі зменшенням частоти і збільшенням амплітуди коливань подачі суміші, довжина області нерівномірного руху зростає. Однак змінювання початкової швидкості по ширині решета в роботі не розглянуто.

Для врахування впливу на процес бокових стінок решітного стану, в роботі [18] розроблена теорія руху суміші по решету скінченної ширини. Застосування методу Бубнова-Гальоркіна дозволило описати крайовий ефект біля стінок з високою точністю і визначити середню швидкість суміші та продуктивність решета. Але поперечна складова швидкості вважається рівною нулю, поздовжня складова швидкості не залежить від довжини, а товщина шару усереднена по довжині решета. Прийняті при розрахунках спрощення не дають можливості дослідити розподіл завантаження по площі робочої поверхні.

Для стабілізації і рівномірного розподілу потоку на поверхні решета в роботі [19] розроблена математична модель регулювання рівня суміші на поверхні решета з врахуванням зовнішніх і внутрішніх збурень діючих на об'єкт регулювання. Регулювання рівня суміші залежить від швидкості проходження частинок через отвори решіт і об'єму матеріалу, що потрапляє в бункер. Однак в роботі не розглянуто нерівномірну подачу на вході решета.

Для поліпшення процесу завантаження в роботі [20] пропонується застосування перегрібачів шару при великих за величиною подачах матеріалу на вході решета. Зернова суміш, потрапляючи у зону дії перегрібачів, перерозподіляється і тим самим покращуються умови сепарування. В роботі [21] для рівномірного завантаження сепаруючого органу запропонований живильник, що складається з циліндричних лопатевих котушок різного діаметру. Лопаті живильника мають однакову довжину, направлені в сторону зворотню обертання вала, а їх утворююча виконана по брахістохроні. Почергове розташування котушок на валу дозволяє розподілити зернову суміш рівномірно по ширині. Однак запропоновані конструкції нових робочих органів потребують теоретичного обґрунтування у взаємозв'язку з дослідженнями кінематичних характеристик потоку по всій площі поверхні решета.

Для покращення завантаження ряд дослідників вдалися до зміни форми поверхні решета [22]. Розроблена криволінійна форма плоского решета, що забезпечує рівномірне заповнення матеріалом його робочої поверхні. Зміна місцевого завантаження решета забезпечувалась змінним кутом нахилу до горизонту його ділянок. Зменшення кута нахилу ділянки решета приводило до зменшення швидкості переміщення матеріалу в цьому місці та, відповідно, до збільшення ступеня його заповнення матеріалом. За результатами досліджень продуктивність такого решета збільшилась. Але така форма решета забезпечує однакову товщину шару по його довжині і не регулює питому витрату матеріалу по ширині.

Таким чином, в дослідженні процесу завантаження решета не розглянуто вплив нерівномірності подачі по ширині на вході решета на процес завантаження, не досліджені кінематичні характеристики потоку на всій площі поверхні решета, які пояснюють причини перевантаження або недовантаження ділянок поверхні. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність процесу обумовлює необхідність проведення досліджень, присвячених визначенню впливу нерівномірності подачі по ширині решета на процес його завантаження.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження впливу нерівномірної по ширині віброрешета подачі сипкої суміші на процес його завантаження. Це дозволить встановити ділянки перевантаження та недовантаження решета, їх розташування, величину відхилень від початкового завантаження для різних умов подачі суміші на вході.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- встановити закономірності товщини шару, поздовжньої та поперечної складових швидкості, щільності сипкої суміші на всій площі поверхні вібраційного решета;
- визначити вплив нерівномірної по ширині подачі на вході віброрешета на завантаження робочої поверхні.

4. Матеріали та методи дослідження просторового руху сипкої суміші на віброрешеті

Для встановлення закономірностей параметрів руху сипкої суміші на всій площі віброрешета, які визначатимуть питоме завантаження його робочої поверхні, необхідно розглянути просторовий рух суміші.

Потік суміші потрапляє на решето через вхідний переріз CDD_1C_1 решітного стану (рис. 1), розподіляється по робочій поверхні та виходить через вихідний переріз ABB_1A_1 . Стан здійснює коливальний рух, нахилений під кутом θ до горизонту і має паралельні бокові стінки розташовані перпендикулярно до поверхні решета ADD_1A_1 . Система координат обрана так, що її початок лежить в площині CDD_1C_1 , вісь Ox направлена вздовж довжини решета до вихідного перерізу ABB_1A_1 , вісь Oy направлена вздовж ширини решета, а вісь Oz вздовж нормалі до поверхні решета.

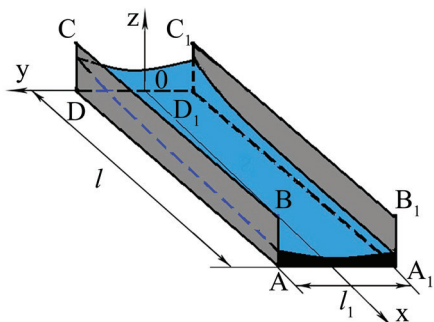


Рис. 1. Схема потоку суміші на віброрешеті

У роботі [23] для дослідження динаміки потоку сипкої суміші розроблена математична модель просторового

руху на віброрешеті скінченної ширини. Вплив просіювання на рух суміші не враховувався, так як вміст прохідної фракції у вихідній суміші для підсвічних і сортувальних решіт незначний, а в деяких випадках складає 2–3 %. Дія вібрацій на середовище виявляється в зменшенні внутрішнього тертя при збільшенні інтенсивності вібрацій.

Рівняння динаміки сипкої суміші на віброрешеті мають вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho \right) u + \rho \frac{\partial}{\partial x} u + \left(\frac{\partial}{\partial y} \rho \right) v + \rho \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} u + u \frac{\partial}{\partial x} u + v \frac{\partial}{\partial y} u + w \frac{\partial}{\partial z} u \right) - \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xx} - \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{xy} - \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{xz} - \rho g \sin(\theta) = 0, \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} v + u \frac{\partial}{\partial x} v + v \frac{\partial}{\partial y} v + w \frac{\partial}{\partial z} v \right) - \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xy} - \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yy} - \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{yz} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} w + u \frac{\partial}{\partial x} w + v \frac{\partial}{\partial y} w + w \frac{\partial}{\partial z} w \right) - \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xz} - \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yz} - \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zz} + \rho g \cos(\theta) = 0, \quad (4)$$

де u, v, w – компоненти вектора швидкості руху суцільного середовища; x, y, z – координати декартової системи координат; θ – кут нахилу решета; $\rho = \gamma v$ – щільність середовища з врахуванням порожнеч між частинками; v – об'ємна щільність частинок; γ – щільність частинок суміші; t – час.

Компоненти тензора напружень $\dot{\sigma}$:

$$\dot{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

співпадають з компонентами матриці порядку (3×3) :

$$\begin{pmatrix} -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де p – тиск; μ – динамічний коефіцієнт зсувної в'язкості.

Шар суміші займає область обмежену решето Σ_0 (AA_1D_1D), боковими стінками Σ_1 ($A_1B_1C_1D$) та Σ_2 ($ABCD$), вхідним Σ_3 (AA_1B_1B) і вихідним Σ_4 (CC_1D_1D) перетинами, вільною поверхнею шару Γ (рис. 2).

Товщина шару $h = h(t, x, y, z)$ відраховується вздовж нормалі до решета до вільної поверхні, довжина решета – l , ширина – l_1 . Тоді, вказана область визначається наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
V &= \{0 < x < l, -l_1/2 < y < l_1/2, 0 < z < h\}, \\
\Sigma_0 &= \{0 < x < l, -l_1/2 < y < l_1/2, z = 0\}, \quad (z = 0), \\
\Sigma_1 &= \{0 < x < l, y = -l_1/2, 0 < z < h\}, \quad (y = -l_1/2), \\
\Sigma_2 &= \{0 < x < l, y = l_1/2, 0 < z < h\}, \quad (y = l_1/2), \\
\Gamma &= \{0 < x < l, -l_1/2 < y < l_1/2, z = h\}, \quad (z = h), \\
\Sigma_3 &= \{x = 0, -l_1/2 < y < l_1/2, 0 < z < h\}, \quad (x = 0), \\
\Sigma_4 &= \{x = l, -l_1/2 < y < l_1/2, 0 < z < h\}, \quad (x = l). \quad (7)
\end{aligned}$$

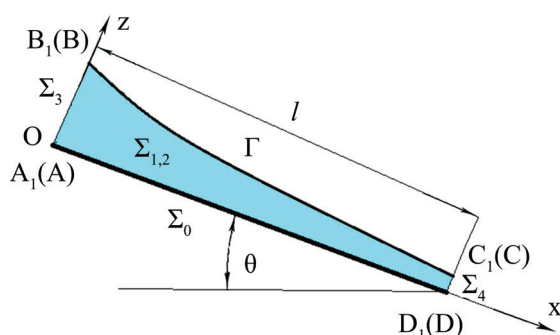


Рис. 2. Схема розташування поверхонь, що обмежують потік суміші

Система рівнянь доповнюється граничними і початковими умовами.

Умова на твердій стінці лотка представляє собою умову непротікання.

$$v_n|_{\Sigma} = 0, \quad (8)$$

де v_n – нормальна складова швидкості суміші на стінці.

Дотичне напруження p_{τ} на Σ :

$$\vec{p}_{\tau} = n_k \sigma_{ki} \tau_i \vec{e}_i = -C_s v_k \tau_k \tau_i \vec{e}_i, \quad (9)$$

де $n = (n_1, n_2, n_3) = (n_x, n_y, n_z)$ – одинична зовнішня по відношенню до об'єму V нормаль до поверхні Σ ; C_s – феноменологічний коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту Шезі; $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3\}$ – довільний одиничний дотичний до Σ вектор; e_i – вектори базису декартової системи координат.

На вхідному перерізі решета задаються розподіли:

$$\begin{aligned}
\rho_0 &= \rho(t, 0, y, z), \quad u_0 = u(t, 0, y, z), \\
v_0 &= v(t, 0, y, z), \quad w_0 = w(t, 0, y, z), \\
h_0 &= h(t, 0, y). \quad (10)
\end{aligned}$$

Вибір відповідних характеристик приймається з експериментальних даних.

Відповідні умови задаються на вихідному перерізі Σ_4 :

$$\begin{aligned}
\left. \frac{\partial u(t, x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=l} &= 0, \quad \left. \frac{\partial v(t, x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \\
\left. \frac{\partial w(t, x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=l} &= 0. \quad (11)
\end{aligned}$$

На вільній поверхні зернового шару «Г» встановлюється кінематична гранична умова:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = w, \quad (12)$$

і дві динамічні умови: одна витікає із закону збереження маси і виражає собою безперервність потоку маси через «Г»:

$$\langle \rho(v_n - W) \rangle = 0, \quad (13)$$

де W – нормальна складова швидкості руху поверхні розриву середовища Γ ; v_n – нормальна складова швидкості частинок на Γ , кутові дужки означають стрибок відповідної функції на Γ .

Інша динамічна умова виражає собою безперервність напружень під час переходу через «Г»:

$$-2 \left(\frac{\partial}{\partial x} h \right) \sigma_{xz} - 2 \left(\frac{\partial}{\partial y} h \right) \sigma_{yz} + \sigma_{zz} + P_0 = 0, \quad (14)$$

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} h \right) \sigma_{xx} - \left(\frac{\partial}{\partial y} h \right) \sigma_{xy} + \sigma_{xz} + \sigma_{zz} \frac{\partial}{\partial x} h = 0, \quad (15)$$

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} h \right) \sigma_{xy} - \left(\frac{\partial}{\partial y} h \right) \sigma_{yy} + \left(\frac{\partial}{\partial y} h \right) \sigma_{zz} + \sigma_{yz} = 0, \quad (16)$$

$$(z = h(t, x, y)),$$

де P_0 – тиск, що чинить повітря на поверхню шару суміші.

Враховуючи, що зернова суміш під дією вібрацій поводить як в'язка рідина [6] та глибина шару мала у порівнянні з лінійними розмірами в площині потоку, була застосована теорія мілкої води в дослідженні руху сипкої суміші [24]. Система рівнянь планового руху потоку сипкої суміші на віброрешеті має вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \gamma + u \frac{\partial}{\partial x} \gamma + v \frac{\partial}{\partial y} \gamma + \gamma \frac{\partial}{\partial x} u + \gamma \frac{\partial}{\partial y} v = 0, \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t} u + u \frac{\partial}{\partial x} u + v \frac{\partial}{\partial y} u + \frac{g \cos \theta}{2} \frac{\partial}{\partial x} h + \\
&+ \frac{hg \cos \theta}{2\gamma} \frac{\partial}{\partial x} \gamma - \frac{2\mu h}{\gamma} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u - \frac{\mu h}{\gamma} \frac{\partial^2}{\partial y^2} u - \frac{2\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial}{\partial x} u - \\
&- \frac{\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial}{\partial y} u - \frac{\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial}{\partial x} v \right) + \frac{C_s}{\gamma} u - g \sin \theta = 0, \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t} v + u \frac{\partial}{\partial x} v + v \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{g \cos \theta}{2} \frac{\partial}{\partial y} h + \\
&+ \frac{hg \cos \theta}{2\gamma} \frac{\partial}{\partial y} \gamma - \frac{\mu h}{\gamma} \frac{\partial^2}{\partial x^2} v - \frac{2\mu h}{\gamma} \frac{\partial^2}{\partial y^2} v - \\
&- \frac{\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial}{\partial x} v - \frac{2\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial}{\partial y} v - \frac{\mu}{\gamma} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial}{\partial y} u \right) + \frac{C_s}{\gamma} v = 0. \quad (19)
\end{aligned}$$

Три рівняння (17)–(19) містять чотири невідомі функції h, γ, u, v . Для замикання цієї системи рівнянь прийнята кінематична гранична умова на вільній поверхні шару:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0. \quad (20)$$

Як видно з рівнянь динаміки тонкого шару, областю визначення невідомих функцій є $\Sigma_0 = \{0 < x < l, -l_1/2 < y < l_1/2\}$. Межа цієї області складається з ліній:

$$L_1 = \{0 < x < l, y = -l_1/2\},$$

$$L_2 = \{0 < x < l, y = l_1/2\},$$

$$L_3 = \{x = 0, -l_1/2 < y < l_1/2\},$$

$$L_4 = \{x = l, -l_1/2 < y < l_1/2\}.$$

На межі L_3 задаються розподіли:

$$\begin{aligned} h(t, 0, y) &= H^0(t, y), \quad \gamma(t, 0, y) = G^0(t, y), \\ u(t, 0, y) &= U^0(t, y), \quad v(t, 0, y) = V^0(t, y). \end{aligned} \quad (21)$$

На лініях L_1, L_2 виконуються умови:

$$v(t, x, -l_1/2) = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=-l_1/2} - \frac{C_s}{\mu} u \Big|_{y=-l_1/2} = 0, \quad (22)$$

$$v(t, x, l_1/2) = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=l_1/2} + \frac{C_s}{\mu} u \Big|_{y=l_1/2} = 0. \quad (23)$$

Чисельне розв'язання рівнянь виконано скінченнорізницевою методом в роботі [25]. Суть методу полягає в тому, що диференціальні оператори по просторовим змінним замінюються скінченнорізницевою операторами в вузлах сітки, при цьому вони повинні як можна точніше апроксимувати диференціальні. Застосовані скінченнорізницеви оператори, що мають другий порядок точності.

Зміни, що вносять граничні умови до коефіцієнтів різницевої операторів, враховані в рівняннях, що представляють собою систему звичайних диференціальних рівнянь відносно векторної змінної. До доданків рівнянь віднесені головні члени рівнянь динаміки, що впливають на швидкість збіжності наближених розв'язань до точних. До правих частин віднесені доданки, що містять мішані похідні. В такому виді рівняння підготовлені до застосування різницевого методу розщеплення [26].

Для отримання стаціонарного розв'язання задачі використані наступні положення: наявність дисипації в задачі приводить до того, що при незмінних зовнішніх умовах сипкої суміші з часом стабілізується і незалежно від початкових умов приходить в свій стаціонарний стан. Далі формулюється початково-крайова задача з незмінними граничними умовами, а стаціонарне розв'язання розглядається як асимптотичне.

Багатомірність задачі приводить до необхідності розв'язання систем, що містять велику кількість рівнянь. До того ж, при розв'язанні останніх можливо виникнення чисельної нестійкості алгоритму. Спосіб розв'язання рівнянь полягає в переході від диференціальних рівнянь до системи алгебраїчних рівнянь шляхом заміни оператора диференціювання за часом скінченно-різницевою.

В подальшому застосована неявна різницева схема, що відповідає методу Кранка-Ніколсона з подвійним кроком за часом, і має другий порядок точності як за часом, так і за просторовими змінними.

Початкові умови:

$$\begin{aligned} h(0, x, y) &= H^{(0)}(y) \exp(-\kappa x / l), \\ \gamma(0, x, y) &= G^{(0)}(y) \exp(-\kappa x / l), \\ u(0, x, y) &= U^{(0)}(y) \exp(-\kappa x / l), \\ v(0, x, y) &= V^{(0)}(y) \exp(-\kappa x / l), \end{aligned} \quad (24)$$

містять параметр κ , що визначає швидкість спадання відповідної величини зі змінюванням x (при $\kappa=0$ початкові дані не залежать від x). В подальшому приймаємо величини $H^{(0)}, G^{(0)}, U^{(0)}$ сталими, причому $U^{(0)}$ зв'яжемо з секундною об'ємною витратою Q співвідношенням $Q = U^{(0)} l_1$. Величина $V^{(0)}$ визначає поперечну до осі лотка складову швидкості. Її значення оберемо у вигляді функціональної залежності:

$$V^{(0)}(y) = V_0^0 \left[\frac{64}{3} \left(\frac{y}{l_1} \right)^3 - \frac{16}{3} \frac{y}{l_1} \right]. \quad (25)$$

При $V_0^0 > 0$ потік прагне до звуження, а при $V_0^0 < 0$ – до розширення всередині лотка.

Питоме завантаження лотка $q = q(x, y)$:

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \int_x^{x+\Delta x} \int_y^{y+\Delta y} \int_0^h \rho(x', y', z) u(x', y', z) dz dx' dy' = \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \int_x^{x+\Delta x} \int_y^{y+\Delta y} \gamma(x', y') u(x', y', z) dx' dy' = \gamma(x, y) u(x, y). \end{aligned} \quad (26)$$

Отже:

$$q(x, y) = \gamma(x, y) u(x, y). \quad (27)$$

Таким чином, питоме завантаження на будь-якій ділянці поверхні решета визначається двома характеристиками потоку – поверхневою щільністю сипкої суміші та швидкістю руху.

5. Результати досліджень кінематичних характеристик потоку суміші та завантаження решета при нерівномірній по ширині подачі на вході

Для визначення впливу нерівномірної по ширині подачі на кінематичні характеристики потоку та завантаження робочої поверхні необхідно задати початкові умови на вході віброрешета. Нерівномірність подачі суміші на вході визначається профілем початкової швидкості по ширині решета. Розглянемо різноманітні профілі швидкості та дослідимо їхній вплив на кінематичні характеристики потоку суміші та завантаження поверхні на всій площі решета. Рівняння профілів початкової швидкості по ширині визначались апроксимацією експериментальних значень швидкості на вході решета.

Для проведення чисельних розрахунків приймаємо наступні параметри процесу: щільність сипкої суміші 800 кг/м^3 ; завантаження на вході решета 12000 кг/год ; поперечна до осі лотка складова швидкості суміші $V_0^0 = 0 \text{ м/с}$; тиск, на поверхні шару суміші $P_0 = 20 \text{ кг/м} \cdot \text{с}^2$; довжина решета $l = 1,5 \text{ м}$; ширина решета $l_1 = 0,8 \text{ м}$; кут нахилу решета до горизонту $\theta = 10^\circ$; емпіричний коефіцієнт $\kappa = 0$; коефіцієнт зсувної в'язкості $\mu = 0,2 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$, феноменологічний коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту Шезі $C_2 = 10 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

При висипанні зернової суміші із бункерів, найбільш розповсюдженим є опуклий по ширині профіль початкової швидкості на вході решета. Такий профіль обумовлений тертям суміші по боковим стінкам бункера, що приводить до зменшення її швидкості на бокових ділянках у порівнянні з центральною.

На рис. 3 представлені характеристики потоку суміші на решеті при опуклому по ширині профілі початкової швидкості:

а) – товщина шару,

б) – поверхнева щільність суміші,

в), г) – поздовжня та поперечна складові швидкості,

д) – питоме завантаження.

Профіль початкової швидкості суміші по ширині решета задається рівнянням $u(y) = 0,8 - 2,2y^2$.

Протилежний за характером, увігнутий профіль швидкості по ширині решета, можливий при потраплянні в бункер великих домішок, неоднорідних фізико-механічних властивостях суміші, деформації направляючих поверхонь.

На рис. 4 представлені характеристики потоку суміші на решеті при увігнутому по ширині профілі початкової швидкості:

а) – товщина шару,

б) – поверхнева щільність суміші,

в), г) – поздовжня та поперечна складові швидкості,

д) – питоме завантаження.

Профіль початкової швидкості суміші по ширині решета задається рівнянням $u(y) = 0,6 + 2,5y^2$.

У випадку неправильного налаштування завантажувальних пристроїв, перекошеної заслінки бункера, похибок монтажу вузлів машини, профіль швидкості суміші по ширині решета набуває форму прямокутного трикутника, а суміш зосереджується біля однієї бокової стінки.

На рис. 5 представлені характеристики потоку суміші на решеті при трикутному по ширині профілі початкової швидкості:

а) – товщина шару,

б) – поверхнева щільність суміші,

в), г) – поздовжня та поперечна складові швидкості,

д) – питоме завантаження.

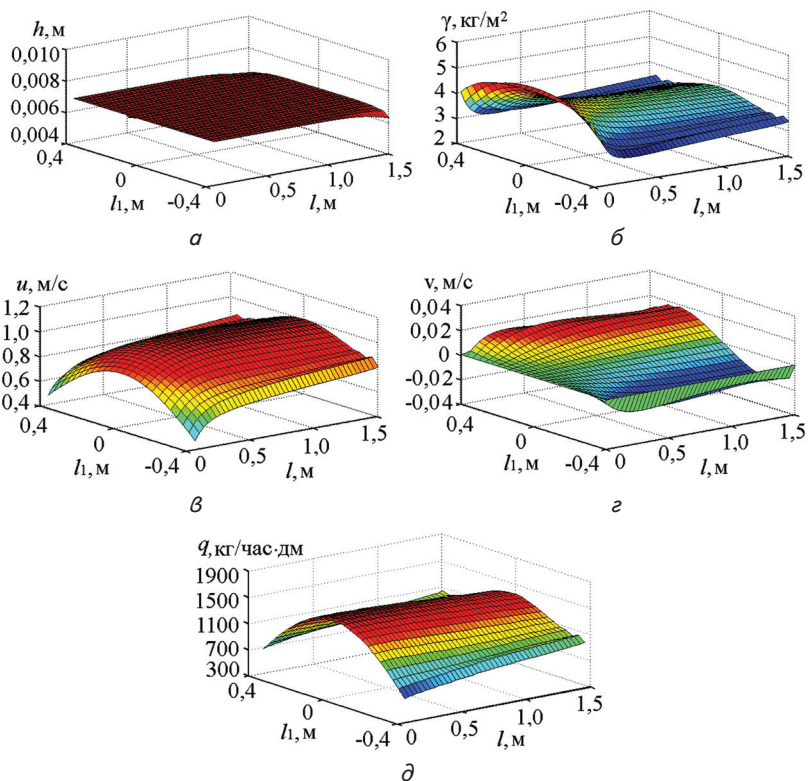


Рис. 3. Характеристики потоку сипкої суміші при опуклому по ширині профілі початкової швидкості: а – товщина шару; б – поверхнева щільність суміші; в, г – поздовжня та поперечна складові швидкості; д – питоме завантаження

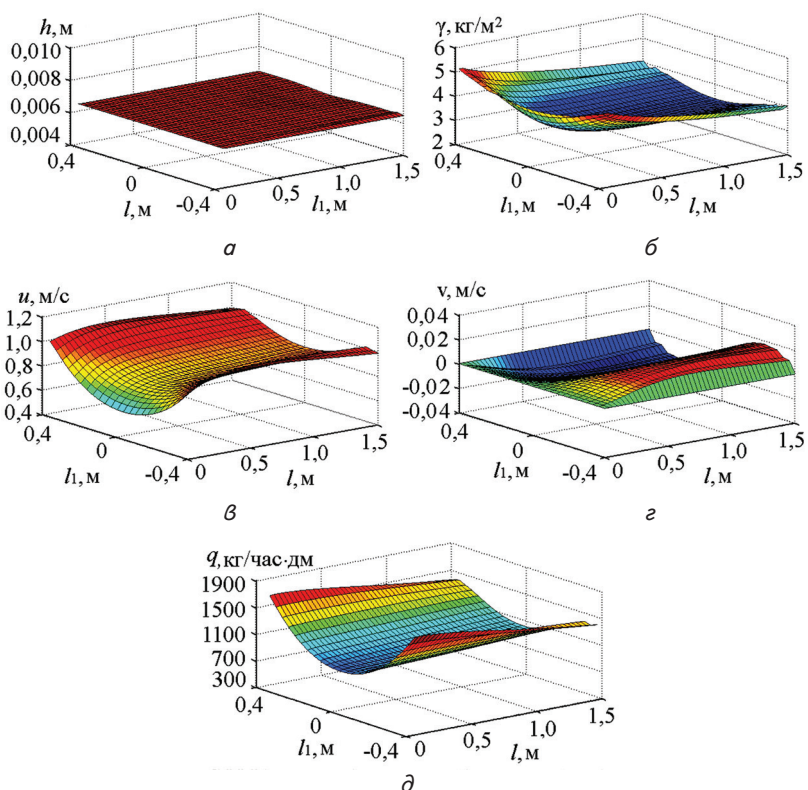


Рис. 4. Характеристики потоку сипкої суміші при увігнутому по ширині профілі початкової швидкості: а – товщина шару; б – поверхнева щільність суміші; в, г – поздовжня та поперечна складові швидкості; д – питоме завантаження

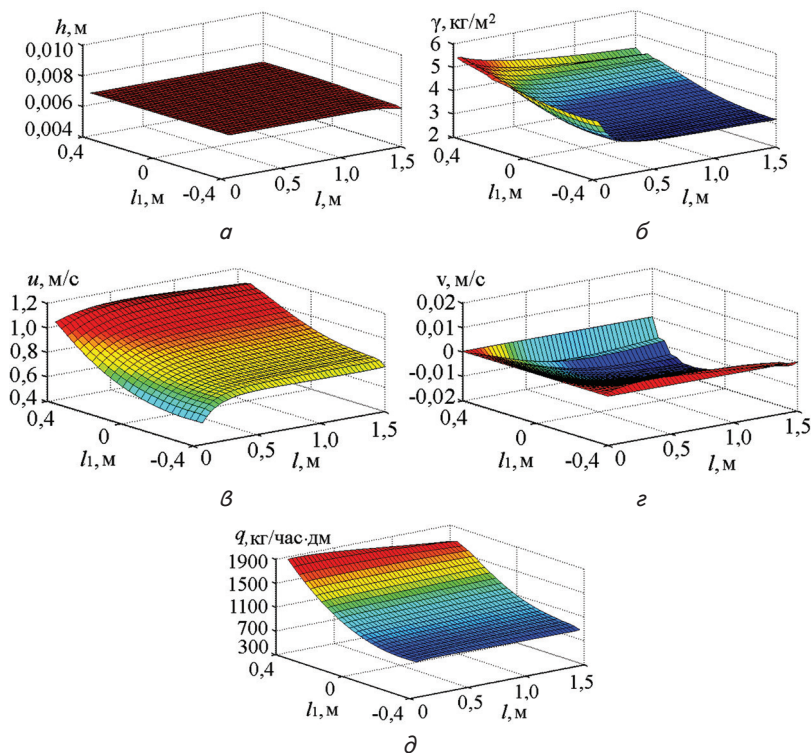


Рис. 5. Характеристики потоку сипкої суміші при трикутному по ширині профілі початкової швидкості: а – товщина шару; б – поверхнева щільність суміші; в, г – поздовжня та поперечна складові швидкості; д – питоме завантаження

Профіль початкової швидкості суміші по ширині решета задається рівнянням $u(y) = 0,8 + 0,6y + 0,4y^2$.

Встановлені закономірності розподілу товщини шару, поверхневої щільності, поздовжньої та поперечної складових швидкості суміші, питомого завантаження визначають вплив нерівномірної подачі на процес завантаження всієї площі віброрешета. Отримані залежності визначають ділянки перевантаження або недовантаження решета, їх розташування, величину відхилення від початкового завантаження та встановлюють причини їх виникнення. Результати дослідження необхідні при проектуванні живильників та розподільників сипкої суміші та розрахунку режимів сепарування.

6. Обговорення результатів дослідження впливу нерівномірної по ширині віброрешета подачі сипкої суміші на процес його завантаження

Товщина шару, для розглянутих профілів початкової швидкості, залишається незмінною на всій поверхні решета (рис. 3, а – 5, а), а її сталість забезпечується відповідним змінюванням щільності шару та швидкості суміші.

При опуклому профілі початкової швидкості кінематичні характеристики потоку суміші змінюються наступним чином. Поверхнева щільність суміші біля вхідного перерізу потоку (рис. 3, б) різко зменшується, а далі, по мірі просування суміші вздовж решета зменшується незначно. Ближче до вихідного перерізу потоку поверхнева щільність вирівнюється по ширині. Біля поздовжньої осі решета спостерігається ущільнення шару.

Поздовжня складова швидкості суміші, біля вхідного перерізу потоку, (рис. 3, в) збільшується, а далі, по мірі

просування суміші вздовж решета, мало змінюється. Спостерігається збільшення швидкості біля поздовжньої осі решета, що обумовлено опуклим профілем початкової швидкості на вході решета. По мірі просування суміші вздовж решета, профіль поздовжньої складової швидкості поступово вирівнюється по ширині.

Поперечна складова швидкості суміші (рис. 3, г) дуже мала за величиною в порівнянні з поздовжньою. Характер зміни поперечної складової швидкості такий, що приводить до ущільнення потоку ближче до поздовжньої осі решета. Це обумовлено зміною поздовжньої складової швидкості по ширині решета. Частинки суміші, біля поздовжньої осі решета, рухаються швидше і захоплюють з країв частинки, які рухаються з меншою швидкістю, що приводить до ущільнення шару вздовж осі решета.

Питоме завантаження решета змінюється по всій його поверхні та має опуклий профіль (рис. 3, д). Це зумовлено зміною поздовжньої швидкості та щільності суміші, які приймають найбільші значення вздовж осі решета. Найбільші відхилення питомого завантаження від середнього значення мають місце біля вхідного перерізу потоку, що пояснюється ущільненням суміші на цій ділянці.

Вздовж осі решета відхилення більш за середнє значення, що свідчить про перевантаження цієї ділянки, а вздовж країв – менші, що вказує на недовантаження. По мірі просування суміші вздовж решета, відхилення питомого завантаження від середнього значення зменшуються, що пояснюється стабілізацією щільності і швидкості з довжиною.

При увігнутому профілі початкової швидкості кінематичні характеристики потоку суміші змінюються наступним чином. Поверхнева щільність суміші, по мірі її просування вздовж решета, зменшується плавно біля бокових стінок, і більш різко в центральній частині. Функція щільності суміші має увігнутий профіль, тобто біля бокових стінок решета спостерігається ущільнення шару. Ближче до вихідного перерізу потоку поверхнева щільність поступово вирівнюється по ширині.

Характер поздовжньої швидкості змінився на протилежний – в центральній частині решета вона менша ніж біля бокових стінок і має увігнутий профіль. На вході решета відбувається зростання поздовжньої швидкості в центральній його частині, а далі по мірі просування суміші вздовж решета вона мало змінюється. На бокових стінках залежність поздовжньої швидкості від довжини решета більш плавна.

Поперечна складова швидкості суміші (рис. 4, г) значно менше поздовжньої, і напрямлена від бокових стінок до осі решета, що приводить до ущільнення суміші в цьому напрямі.

Характер питомого завантаження поверхні решета змінився у відповідності зі зміною поздовжньої швидкості та щільності суміші. В центральній частині решета поверхня недовантажена матеріалом, а біля бортів – перевантажена. Це пояснюється увігнутим профілем початкової швидкості та щільності суміші на вході решета, що визначає

кількість суміші, яка подається на роботу поверхню. Відхилення питомого завантаження від середнього значення поступово зменшуються з довжиною решета.

При трикутному по ширині профілі початкової швидкості кінематичні характеристики потоку суміші змінюються наступним чином. Поверхнева щільність суміші найбільша біля однієї бокової стінки і зменшується у напрямку протилежної. Вздовж довжини решета поверхнева щільність поступово зменшується у напрямі вихідного перерізу потоку.

Поздовжня складова швидкості суміші має профіль початкової швидкості на вході решета, тобто найбільші значення мають місце біля однієї бокової стінки і зменшується у напрямі протилежної. Характер зміни швидкості по довжині більш виражений біля стінки з найменшими значеннями.

Поперечна складова швидкості суміші (рис. 5, з) значно менше поздовжньої, і напрямлена від однієї стінки до іншої, що приводить до ущільнення суміші в цьому напрямі.

Питоме завантаження робочої поверхні змінюється по ширині решета, у відповідності з трикутним профілем поздовжньої швидкості та щільності суміші на решеті. Біля однієї бокової стінки робоча поверхня перевантажена, біля протилежної – недовантажена. По довжині решета питоме завантаження змінюється мало.

Профілі початкової швидкості на вході решета змінюють характеристики потоку по довжині майже однаково, а по ширині у відповідності з профілем. Питоме завантаження решета визначається поверхневою щільністю та швидкістю руху суміші, а закономірності їх змінювання обумовлюють ділянки перевантаження та недовантаження робочої поверхні.

Таким чином, нерівномірна по ширині подача сипкої суміші, яка визначається профілем початкової швидкості на вході решета, чинить суттєвий вплив на кінематичні характеристики потоку і завантаження робочої поверхні. Характер профілю початкової швидкості є визначальним у розподілі ділянок перевантаження або недовантаження робочої поверхні решета.

Результати дослідження рекомендовано застосовувати для підсівних і сортувальних віброрешіт, де просіюється незначна частина суміші 5–10 %, а в деяких випадках 2–3 %. Застосування результатів для розвантажувальних і зернових решіт, які просіюють відповідно до 40 % та 90 % суміші, обмежується граничними умовами на поверхні решета, які б враховували відхід частини матеріалу через решето.

Перспектива розвитку даного дослідження полягає в розробленні способів та пристроїв регулювання завантаження віброрешета за відомим розподілом кінематичних характеристик потоку суміші та ділянок перевантаження і недовантаження робочої поверхні. Врахувати можливі проблеми будь-якого характеру на етапі визначення перспективи досить складно через велике різноманіття можливих конструкцій пристроїв, способів їх реалізації та математичного моделювання процесів.

7. Висновки

1. Нерівномірність подачі сипкої суміші задавалась опуклим, увігнутим та трикутним профілем початкової швидкості по ширині на вході решета. При розглянутих профілях характеристики потоку змінюються однаково по довжині решета. Товщина шару залишається постійною, поверхнева щільність зменшується, поздовжня складова швидкості збільшується, поперечна складова дуже мала у порівнянні з поздовжньою і майже не змінюється.

2. По ширині решета характеристики потоку змінюються у відповідності з профілем початкової швидкості. При опуклому профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж поздовжньої осі решета та найменші біля бокових стінок, поперечна складова швидкості напрямлена від поздовжньої осі. При увігнутому профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж бокових стінок, найменші вздовж поздовжньої осі, поперечна складова швидкості напрямлена від бокових стінок до осі. При трикутному профілі – товщина постійна, поверхнева щільність та поздовжня складова швидкості найбільші вздовж однієї бокової стінки і найменші біля протилежної, поперечна складова швидкості напрямлена до однієї бокової стінки.

3. При опуклому профілі початкової швидкості відбувається перевантаження поверхні вздовж поздовжньої осі решета, та недовантаження біля бокових стінок. При увігнутому профілі – поверхня перевантажена біля бокових стінок, а вздовж поздовжньої осі решета недовантажена. При трикутному профілі – поверхня перевантажена вздовж однієї бокової стінки, і недовантажена вздовж протилежної.

Найбільші відхилення мають місце біля вхідного перерізу потоку, найменші – біля вихідного.

Література

1. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування зерна: монографія. Харків: Око, 2006. 408 с.
2. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах: монография. Киев: УСХА, 1998. 625 с.
3. Моделирование динамики зерновой смеси при сепарировании на рифленом решете вибросепаратора / Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Харченко Ф. М., Харченко С. А. // Інженерія природокористування. 2014. № 2 (2). С. 54–60.
4. Тищенко Л. Н., Харченко С. А. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2013. Т. 15, № 7. С. 94–99.
5. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей: монография. Харьков: «Міськдрук», 2011. 280 с.
6. Тищенко Л. Н. Гидродинамическое моделирование движения слоя зерна по плоским наклонным виброрешетам // Новости научного прогресса – 2012. Материалы VIII Междунар. научно-практ. конф. Т. 8. Болгария: София «Бял.Град.-БГ» ООД, 2012. С. 59–67.

7. Харченко С. А. Моделирование движения пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету // *Mechanization in agriculture*. 2015. № 5. С. 9–13.
8. About motion of grain mixture of variable porosity in the cylindrical sieve of vibrocentrifuge / Olshanskii V., Olshanskii A., Kharchenko S., Kharchenko F. // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2016. Vol. 16, Issue 3. P. 31–34.
9. Кацева Р. З. Влияние неравномерности распределения нагрузки по ширине на просеваемость решет // *Труды ЧИМЭСХ*. 1972. Вып. 62. С. 202–211.
10. Akhmadiev F., Gizzjatov R. Separation Processes of Granular Materials by Sizes at the Sieve Classifiers // *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2013. Vol. 1, Issue 7. P. 56–63.
11. Akhmadiev F. G., Gizzyatov R. F., Kiyamov K. G. Mathematical modeling of thin-layer separation of granular materials on sieve classifiers // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2013. Vol. 47, Issue 3. P. 254–261. doi: <https://doi.org/10.1134/s0040579513030019>
12. Равшанов Н. Математическая модель и новые критерии процесса сепарирования сыпучих смесей // *Вестник ТОГУ*. 2015. № 1 (36). С. 83–92.
13. Гончаров Е. С. Теория неустойчивого движения зерна по поверхности вертикальных цилиндрических центробежновибрационных решет // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1973. Вып. 25. С. 39–44.
14. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П. Решения упрощенных уравнений гидродинамики при моделировании движения зерновой смеси по наклонному плоскому решету // *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ*. 2008. Вип. 74. С. 306–312.
15. Akhmadiev G. F., Gizzyato R. F., Nazipov I. T. Hydrogasdynamics and Kinetics of Separation of Disperse Media on Sieve Classifiers // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90, Issue 5. P. 1077–1086. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1659-x>
16. Тищенко Л. Н. Гидродинамические характеристики псевдооживленных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях // *Вісник ХДТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв*. 2001. Вип. 5. С. 13–33.
17. Тищенко Л. Н., Ольшанський С. В., Ольшанський В. П. Определение закономерностей скорости потока зерновой смеси на виброрешете при неравномерной подаче // *Вісник ХНТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв*. 2009. Вип. 88. С. 5–11.
18. Самурганов Е. Е. О движении виброоживленного сепарируемого слоя зерна по плоскому решету конечной ширины // *Научный журнал КубГАУ*. 2016. № 123 (09). doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-123-036>
19. Погорелова А. С. Математическая модель регулирования уровня смеси на поверхности решета сепарируемого агрегата // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2015. Т. 1. С. 139–141.
20. Повышение эффективности работы плоских решет при больших нагрузках / Шевцов И. В., Низавитин С. С., Михайлов В. В., Кабаков А. А. // *Вестник Курганской ГСХА*. 2012. № 4. С. 68–70.
21. Ковриков И. Т., Тавтилов И. Ш. Направления исследований и конструирования питателей для сепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке // *Вестник ОГУ*. 2003. Вып. 7. С. 196–201.
22. Зюлин А. Н. Исследование процесса сепарации в условиях равномерного распределения материала по поверхности решета // *Труды ВИМ*. 1971. Т. 55. С. 48–57.
23. Piven M. Grain flow dynamics on vibrating flat sieve of finite width // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 15, Issue 3. P. 113–119.
24. Piven M. Equation of the planned flow of granular grain mixture // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2016. Vol. 16, Issue 4. P. 63–72.
25. Piven M. Numerical solution of the problem of spatial movement of a loose mixture in a vibrolot // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2017. Vol. 17, Issue 2. P. 19–28.
26. Ковеня В. М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики: монография. Новосибирск: СО РАН, 2014. 278 с.